

Δρ. Φασουλάς Γιάννης

[jfasoulas@hmu.gr](mailto:jfasoulas@hmu.gr)

Ρομποτική Ι

« Εισαγωγικές έννοιες »



Εργαστήριο Συστημάτων Ελέγχου & Ρομποτικής  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Σχολή Μηχανικών  
Ηράκλειο Κρήτης, Ελλάς



## Στοιχεία Εισηγητή



- Εισηγητής: Δρ.Φασουλάς Γιάννης, Αναπλ. Καθ.
- E-mail επικοινωνίας: [jfasoulas@hmu.gr](mailto:jfasoulas@hmu.gr)
- Τηλ. επικ: [2810-379228](tel:2810-379228), [2810-379184](tel:2810-379184)
- Ώρες γραφείου για τους φοιτητές
  - Δευτέρα 6:00-8:00
  - Τετάρτη 5:00-7:00



- Βασικές γνώσεις ρομποτικών συστημάτων
- Κινηματική στερεού σώματος
  - Θέση και προσανατολισμός
  - Ομογενής μετασχηματισμός (Ο.Μ.)
- Κινηματική Ρομποτικού Βραχίονα
  - Ευθύ κινηματικό πρόβλημα
    - παράμετροι ρομποτικού βραχίονα
    - υπολογισμός του Ο.Μ. του άκρου
  - Αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα
    - Γεωμετρική λύση
    - Μέθοδο κινηματικής αποσύνδεσης
    - Μέθοδο αντίστροφου Ο.Μ.
- Σχεδίαση τροχιών των αρθρώσεων
  - Πολυωνομική Τροχιά 3<sup>ης</sup> τάξης
  - Πολυωνομική Τροχιά 5<sup>ης</sup> τάξης
  - Τροχιά παραβολικής μίξης
- Έλεγχος αρθρώσεων ρομποτικών μηχανισμών
- Ιακωβιανή ρομποτικού βραχίονα
  - Σχέση ταχυτήτων του άκρου με ταχύτητες των αρθρώσεων
  - Σχέση δύναμης επιβολής του ρομπότ με τις ροπές στις αρθρώσεις
- Δυναμικές Εξισώσεις ρομποτικού βραχίονα
  - Ελεύθερη κίνηση στο χώρο
  - Κίνηση με επαφή σε επιφάνεια (κίνηση με περιορισμούς)
- Έλεγχος Ρομποτικού βραχίονα -Αισθητήρια Ρομποτικών συστημάτων

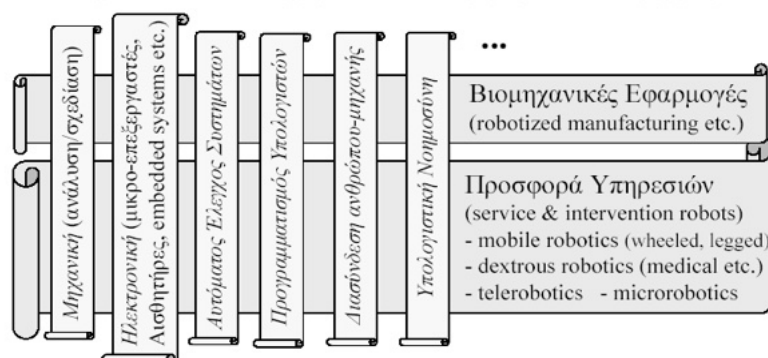


4

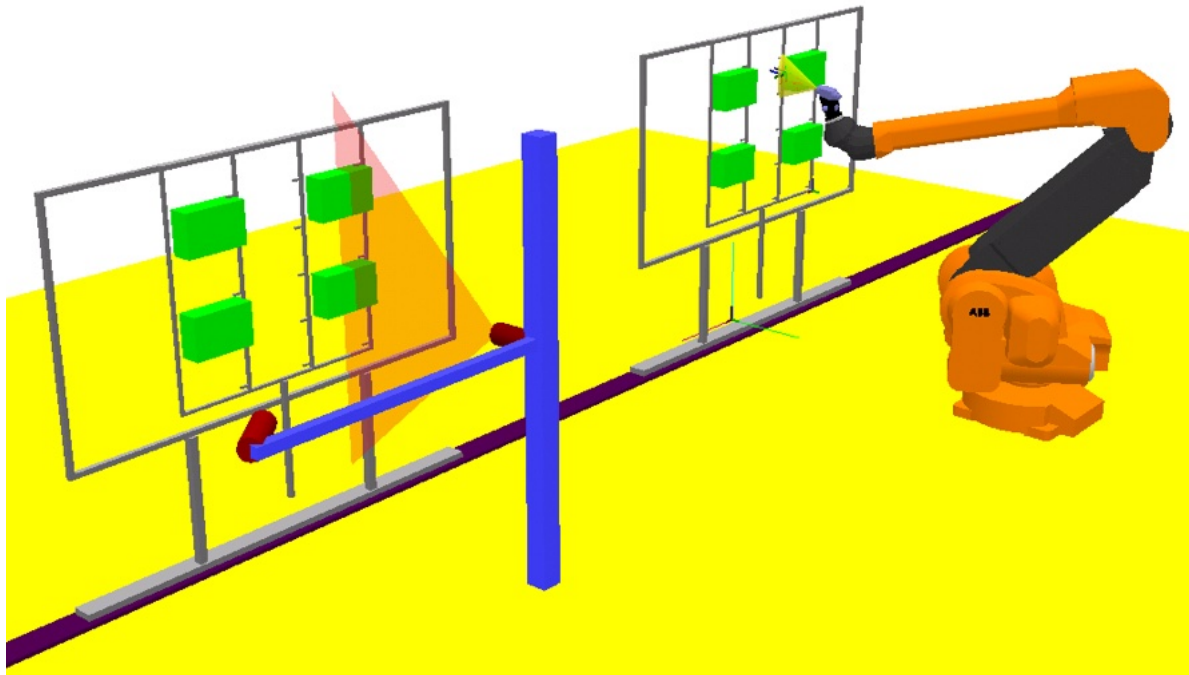
## Γενικά

- Τα ρομπότ είναι μηχανές, η χρήση των οποίων αποσκοπεί στην **αντικατάσταση του ανθρώπου** για την εκτέλεση έργου
- Η αντικατάσταση αυτή αφορά τόσο στο φυσικό επίπεδο του **μηχανικού έργου** όσο και στο επίπεδο **λήψης απόφασης**
- Η ρομποτική είναι ο επιστημονικός κλάδος του μηχανικού που έχει σαν αντικείμενο την σύλληψη, το σχεδιασμό, την κατασκευή, τον έλεγχο και την λειτουργία των ρομπότ.

- **Ρομποτική:** «κατακόρυφη» κατάτμηση σε *θεματολογικά επιστημονικά πεδία* / «οριζόντια» κατάτμηση σε *πεδία εφαρμογών*

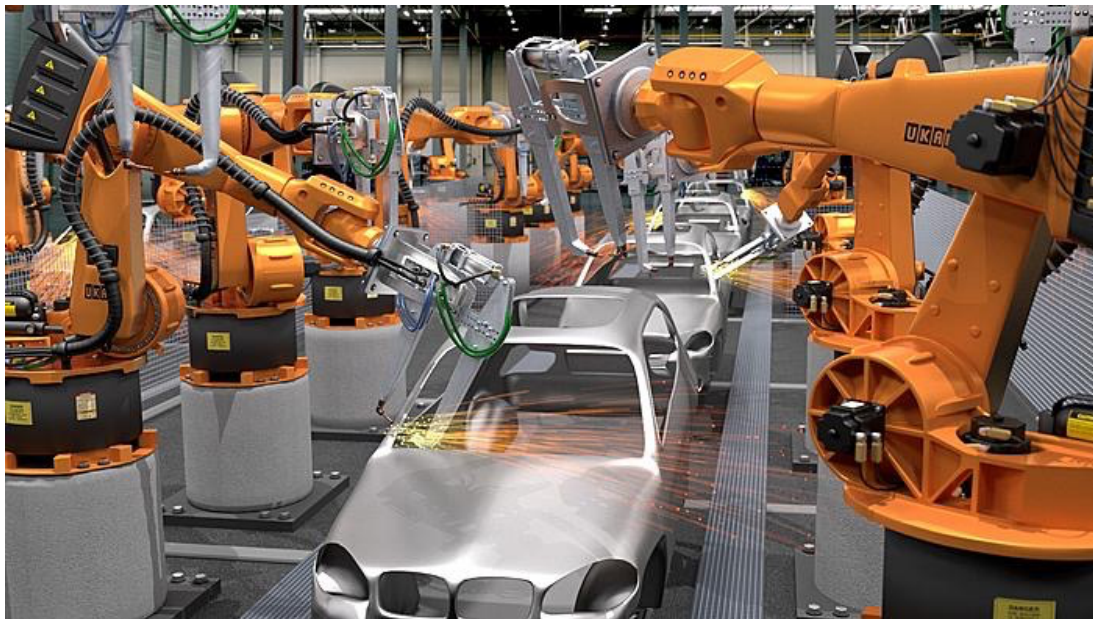


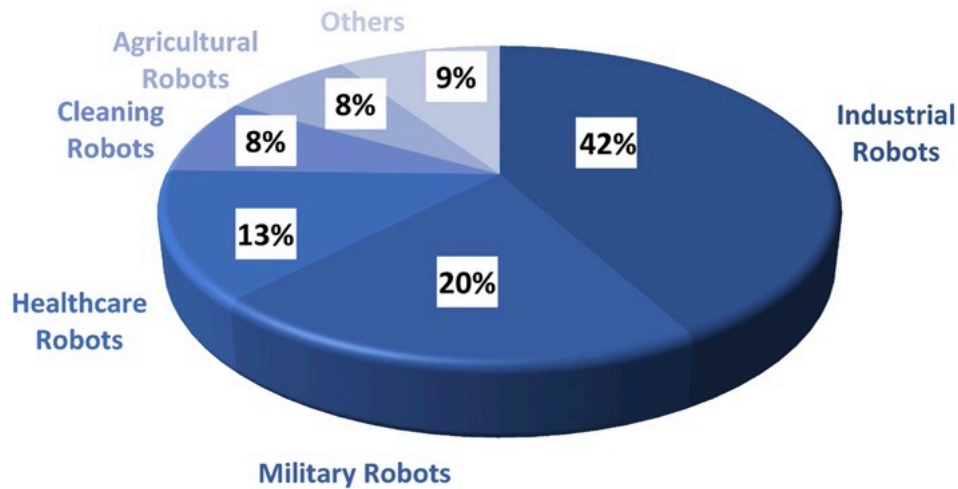
## Χρήση των ρομπότ στην βιομηχανία



6

## Βιομηχανικοί Ρομποτικοί Βραχίονες





Source: Strategic Market Research

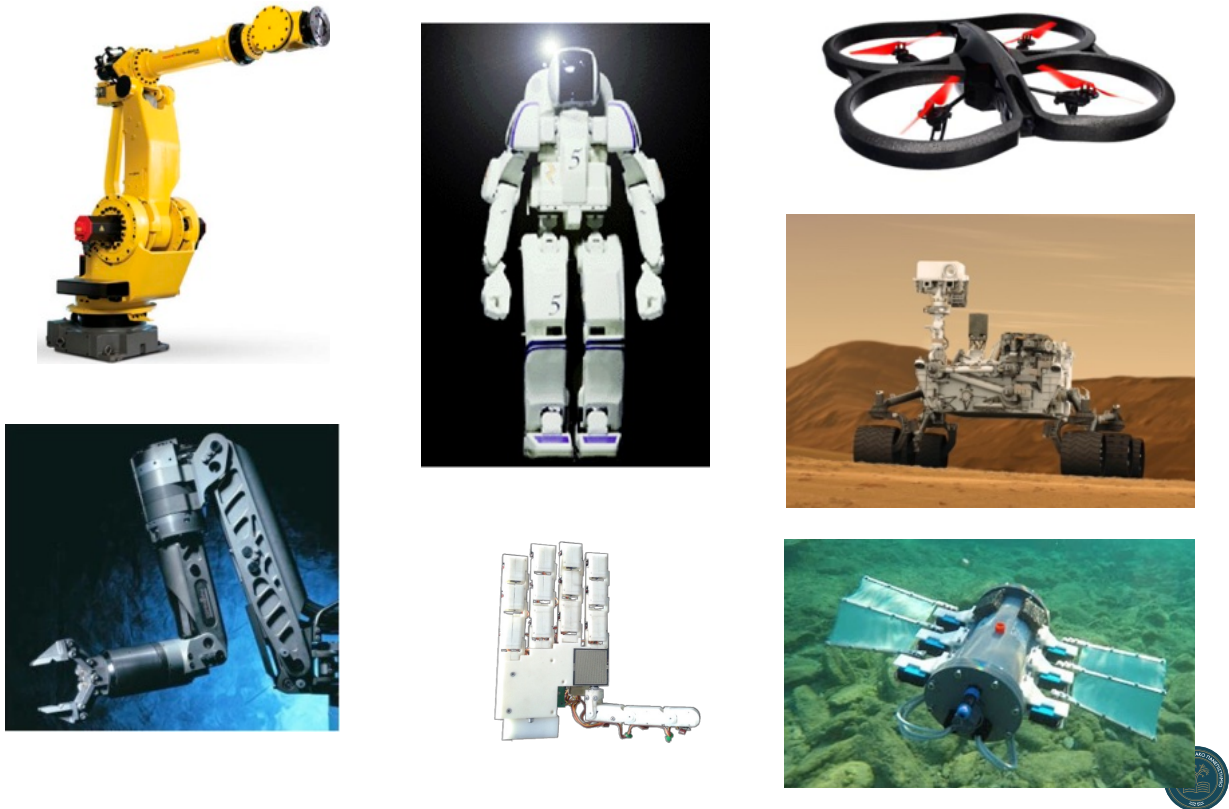


## Χαρακτηριστικά των Βιομηχανικών ρομπότ

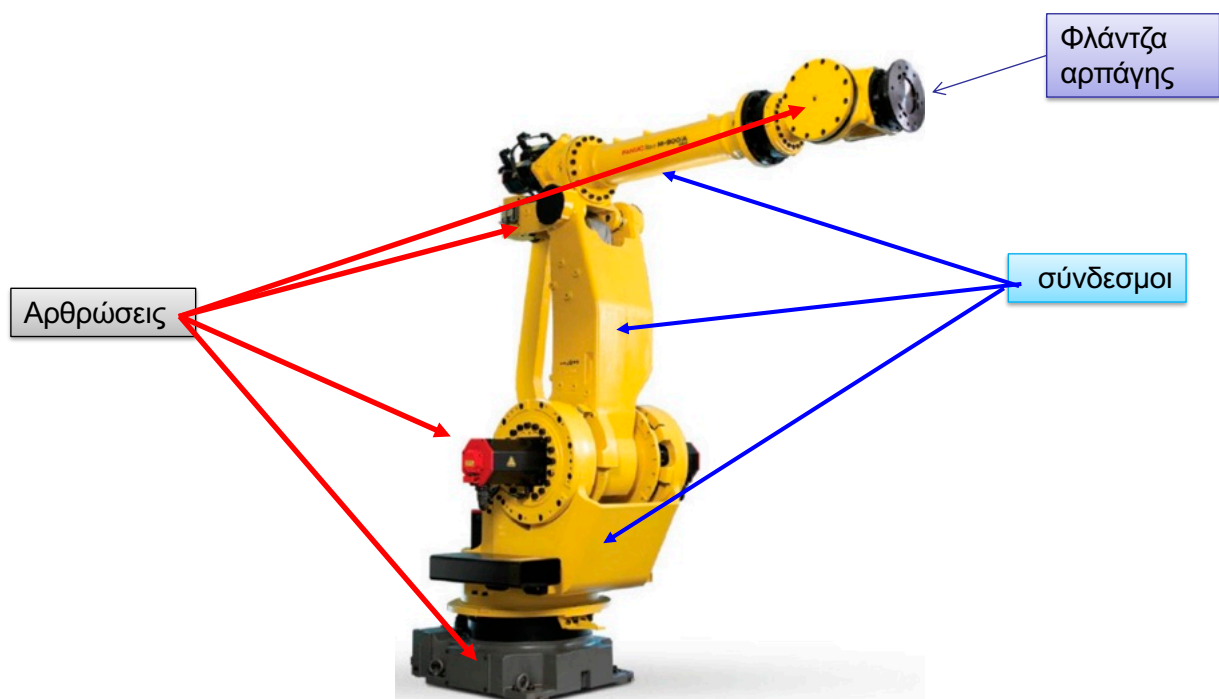
- ❑ Πολύ υψηλή ακρίβεια και επαναληπτική ικανότητα (της τάξης του  $1/10$  mm) ως αντιστάθμισμα της περιορισμένης αντίληψης και αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον.
- ❑ Για να επιτευχθεί αυτό, εκτός του άριστου ελέγχου πρέπει η κατασκευή του βραχίονα να είναι στιβαρή (συνήθως δηλαδή, βαριά).
- ❑ Οι ταχέως εξελισσόμενοι τομείς της μηχανικής όρασης και μηχανικής μάθησης αλλάζουν το τοπίο : Ο οπτικός σερβοέλεγχος και η μηχανική μάθηση θα οδηγήσουν σε βιομηχανικά ρομπότ που θα εκτελούν εργασίες γρήγορα χωρίς την απαίτηση να είναι πολύ στιβαρά ή το περιβάλλον απόλυτα «δομημένο».



## Διάφορα είδη Ρομποτικών συστημάτων

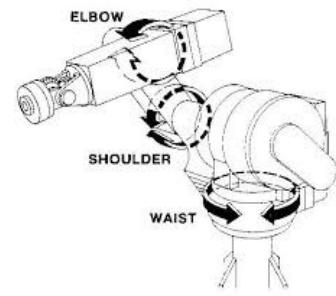
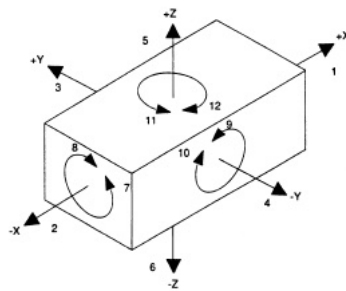
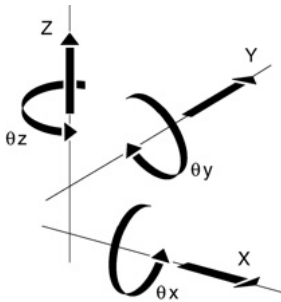


## Γενική περιγραφή του βιομηχανικού ρομποτικού βραχίονα



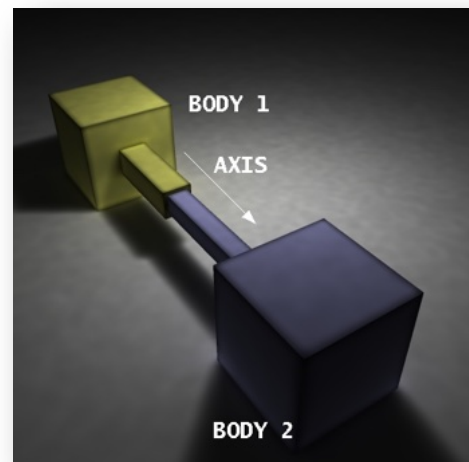
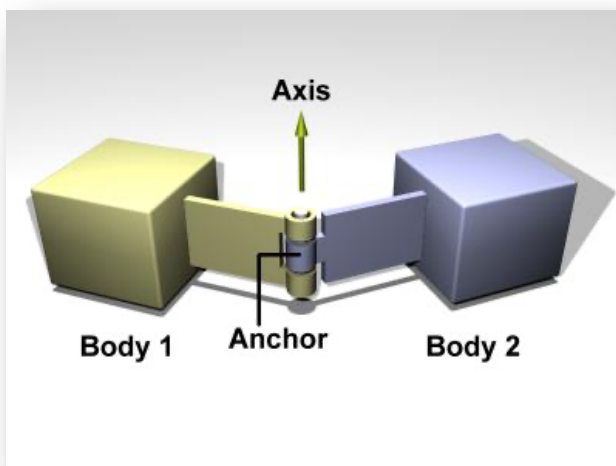
- Ένας ρομποτικός βραχίονας αποτελείται από μια σειρά διαδοχικών στερεών σωμάτων που ονομάζονται **σύνδεσμοι (links)**. Οι σύνδεσμοι συνδέονται ανά δύο μεταξύ τους μέσω **αρθρώσεων (joints)** σχηματίζοντας μια ανοιχτή ή κλειστή κινηματική αλυσίδα.

- **Βαθμοί Κινητικότητας:** Για ένα βραχίονα το πλήθος των βαθμών κινητικότητας είναι σταθερό και ίσο με το πλήθος των αρθρώσεων του (πρισματικών - περιστροφικών).
- **Βαθμοί Ελευθερίας** (που απαιτούνται για την εκτέλεση ενός έργου): άμεσα συνδεδεμένοι με το συγκεκριμένο έργο που καλείται να φέρει εις πέρας ο βραχίονας. Για τη γενική περίπτωση που θέλουμε να τοποθετήσουμε και να προσανατολίσουμε ένα αντικείμενο στον τρισδιάστατο χώρο απαιτούνται 6 βαθμοί ελευθερίας (3 για να τοποθετήσουμε ένα σημείο του αντικειμένου στο χώρο και 3 για να προσανατολίσουμε το αντικείμενο ως προς ένα σύστημα συντεταγμένων αναφοράς). Ένας ρομποτικός βραχίονας με 6 βαθμούς κινητικότητας μπορεί να ανταπεξέλθει σε αυτό το έργο.

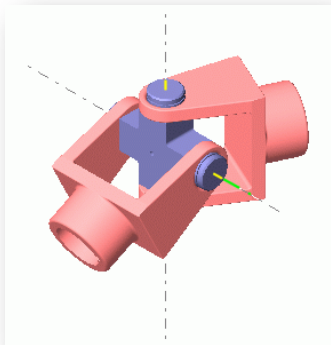
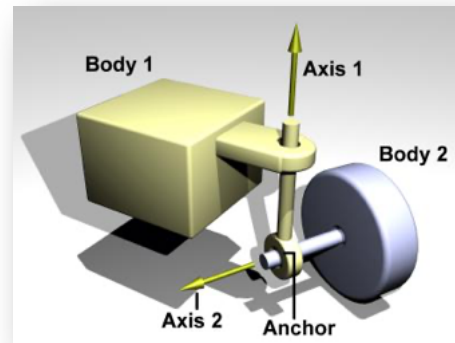
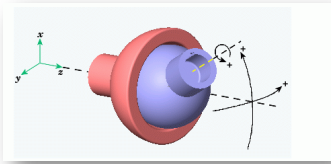
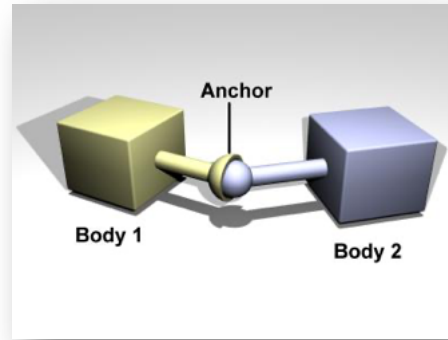
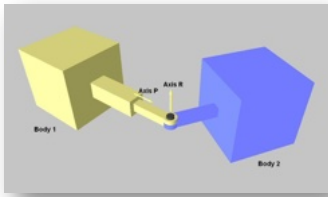


## Βασικές μηχανικές αρθρώσεις ρομποτικών συστημάτων

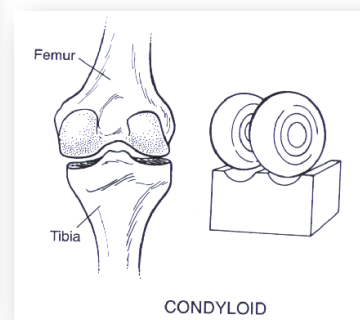
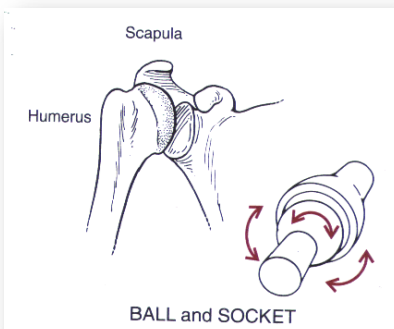
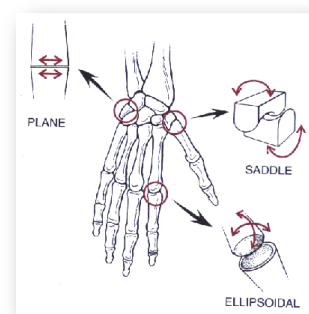
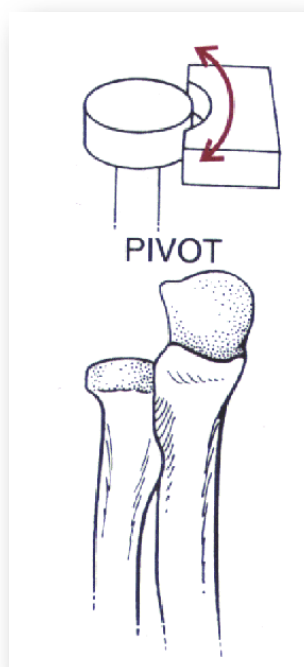
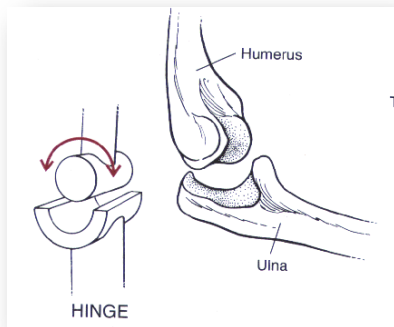
- Περιστροφική άρθρωση (revolute joint)
- Ένας βαθμός ελευθερίας (degree of freedom: d.o.f)
- Η μεταβλητή της άρθρωσης συμβολίζεται με  $\theta$  ή  $q$
- Πρισματική άρθρωση (prismatic joint)
- Ένας βαθμός ελευθερίας
- Συμβολίζεται με  $d$  ή  $q$



# Παραδείγματα πιο σύνθετων μηχανικών αρθρώσεων

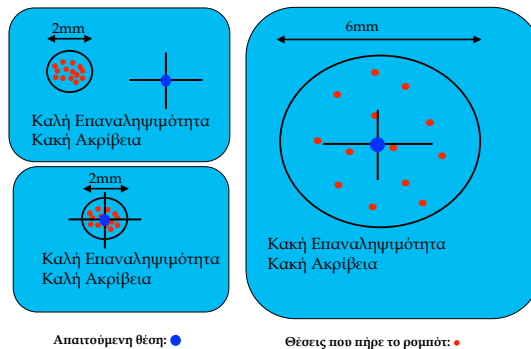


# Μοντελοποίηση των ανθρώπινων αρθρώσεων με μηχανικές αρθρώσεις

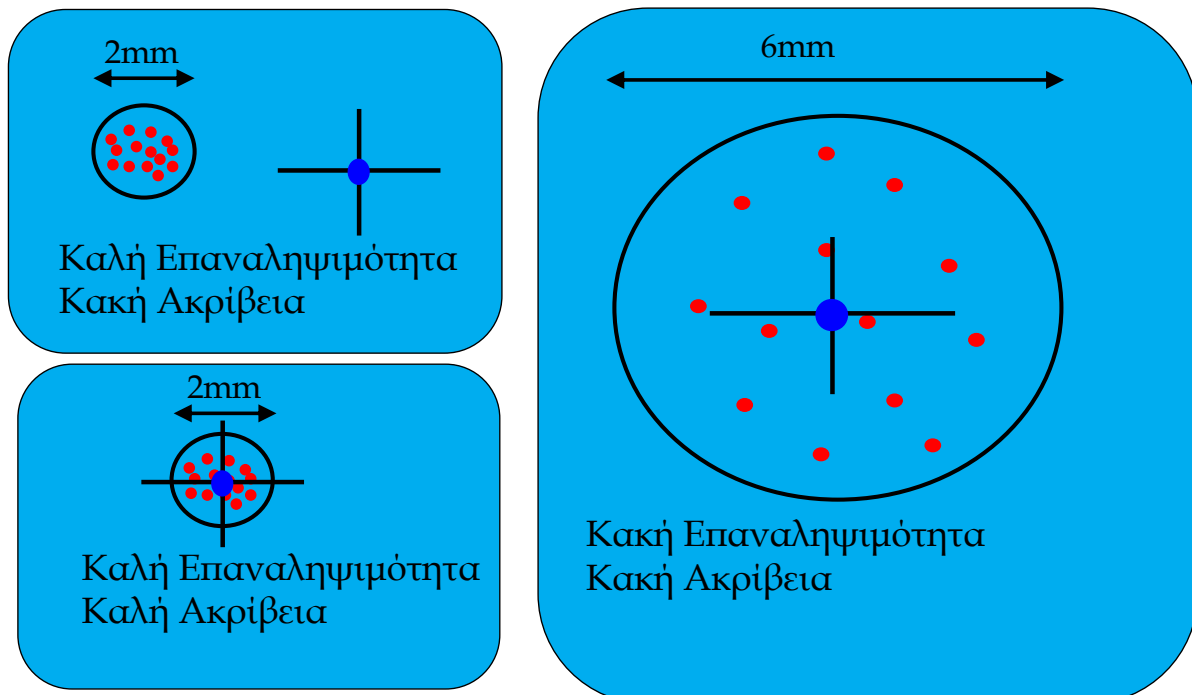


# Βασικά χαρακτηριστικά του Βιομηχανικού ρομποτικού βραχίονα

- **Ωφέλιμο Φορτίο:** βάρος που μπορεί να μεταφέρει το άκρο του βραχίονα. Σημείο εφαρμογής του βάρους θεωρείται η φλάντζα του καρπού. Αυτό το φορτίο δεν είναι σταθερό και εξαρτάται από την ταχύτητα με την οποία πρόκειται να κινηθεί ο καρπός.
- **Επαναληψιμότητα:** δυνατότητα του βραχίονα να γυρίσει στο ίδιο σημείο μετά από αρκετές επαναλήψεις και δίνεται ως εύρος μέσα στο οποίο ο βραχίονας θα τερματίσει την κίνηση. Η απόκλιση οφείλεται στο ότι κατά τη λειτουργία του το ρομπότ είναι δυνατό να χάσει λίγο από τη μέτρηση της θέσης με αποτέλεσμα να μη μπορεί να επιστρέψει στη συγκεκριμένη θέση μετά από ορισμένους κύκλους λειτουργίας.
- **Ακρίβεια:** ικανότητα του ρομπότ να πηγαίνει ακριβώς στη θέση που του έχει δοθεί εντολή να πάει. Εξαρτάται κυρίως από τη διακριτικότητα των εξαρτημάτων ελέγχου, τη μηχανολογική σύνδεση των μελών του και το ελάχιστο επιτρεπόμενο σφάλμα που επιβάλλει η ευστάθεια της λειτουργίας των σέρβο. Επηρεάζεται από το είδος και το μέγεθος του εκάστοτε φορτίου, σε αντίθεση με την επαναληψιμότητα.



# Επαναληψιμότητα και Ακρίβεια του Βιομηχανικού Ρομποτικού Βραχίονα



Απαιτούμενη θέση: ●

Θέσεις που πήρε το ρομπότ: ●



# ΧΩΡΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΡΟΜΠΟΤ

## ΧΩΡΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΡΟΜΠΟΤ

- Όλα τα σημεία στα οποία μπορεί να φτάσει το άκρο του βραχίονα
- Χωρίς περιορισμούς στις αρθρώσεις (περίπτωση α).
- Με περιορισμούς στις αρθρώσεις (περίπτωση β).

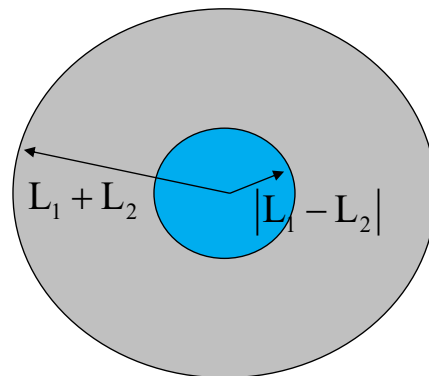
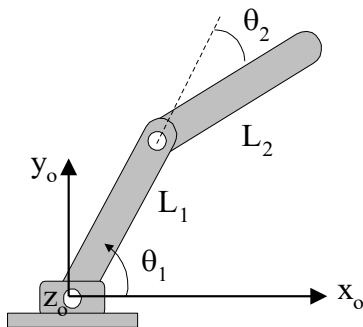
## Παράδειγμα επίπεδου βραχίονα 3 β.ε.

Δυνατός Χώρος Εργασίας

Το σύνολο των μαθηματικών λύσεων του προβλήματος

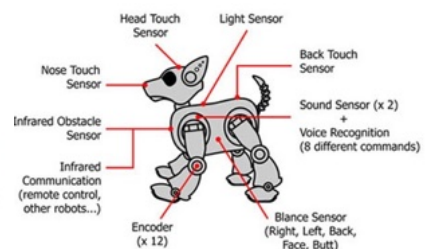
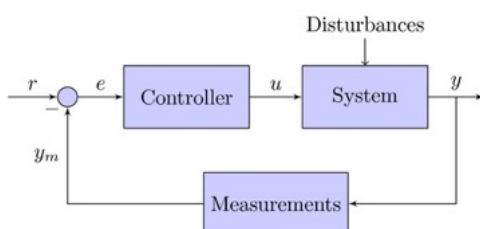
Εφικτός Χώρος Εργασίας

Όρια των αρθρώσεων

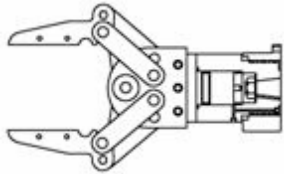


# Τα τρία βασικά υποσυστήματα ενός ρομποτικού χειριστή

- Ένα **μηχανολογικό υποσύστημα**, το οποίο ενσωματώνει τη δυνατότητα του ρομπότ για εκτέλεση έργου. Το υποσύστημα αυτό αποτελείται από μηχανισμούς που επιτρέπουν στο ρομπότ να κινείται όπως αρθρώσεις, συστήματα μετάδοσης κίνησης, επενεργητές-κινητήρες, οδηγούς κλπ..
- Ένα **υποσύστημα αίσθησης**, μέσω του οποίου το ρομπότ συγκεντρώνει πληροφορίες για την κατάσταση στην οποία βρίσκεται τόσο το ίδιο όσο και το περιβάλλον. Το υποσύστημα αυτό εκτός των άλλων είναι υπεύθυνο για την αποδοχή των εξωτερικών εντολών, την επεξεργασία τους, τη μετάφρασή τους σε ηλεκτρική ισχύ που θα δοθεί στους κινητήρες του ρομπότ, καθώς επίσης και για την παραγωγή σημάτων εξόδου που θα πληροφορούν για την κατάσταση του συστήματος. Στο υποσύστημα αίσθησης περιλαμβάνονται όργανα μετρήσεως, αισθητήρες, ηλεκτρονικά στοιχεία κλπ..
- Ένα **σύστημα ελέγχου**, το οποίο συνδυάζει κατάλληλα την αίσθηση με τη δράση, έτσι ώστε το ρομπότ να λειτουργεί αποτελεσματικά και με τον επιθυμητό τρόπο. Ο ελεγκτής του ρομπότ επιβλέπει και συντονίζει ολόκληρο το σύστημα, για τη σχεδίαση και υλοποίησή του δε απαιτείται ο συνδυασμός γνώσεων από πολλές γνωστικές περιοχές, όπως είναι ο αυτόματος έλεγχος, η τεχνητή νοημοσύνη, η επιστήμη των υπολογιστών κλπ..

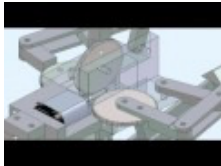


# Αρπάγη παράλληλης λαβής



<http://www.youtube.com/watch?v=HMQ4u9UIPSQ&feature=related>

[http://www.youtube.com/watch?v=xJcz3\\_En\\_8o&NR=1](http://www.youtube.com/watch?v=xJcz3_En_8o&NR=1)



<http://www.youtube.com/watch?v=9ni85tiDnk0>



# Εξειδικευμένη Αρπάγη για κάθε εφαρμογή

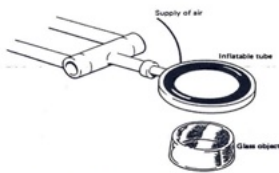
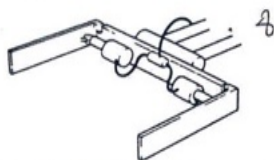
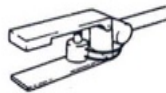


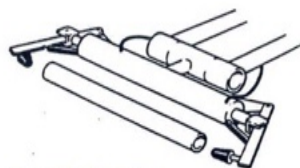
Fig 6.12 Gripper operated by compressed air



(a) Gripper for cardboard boxes



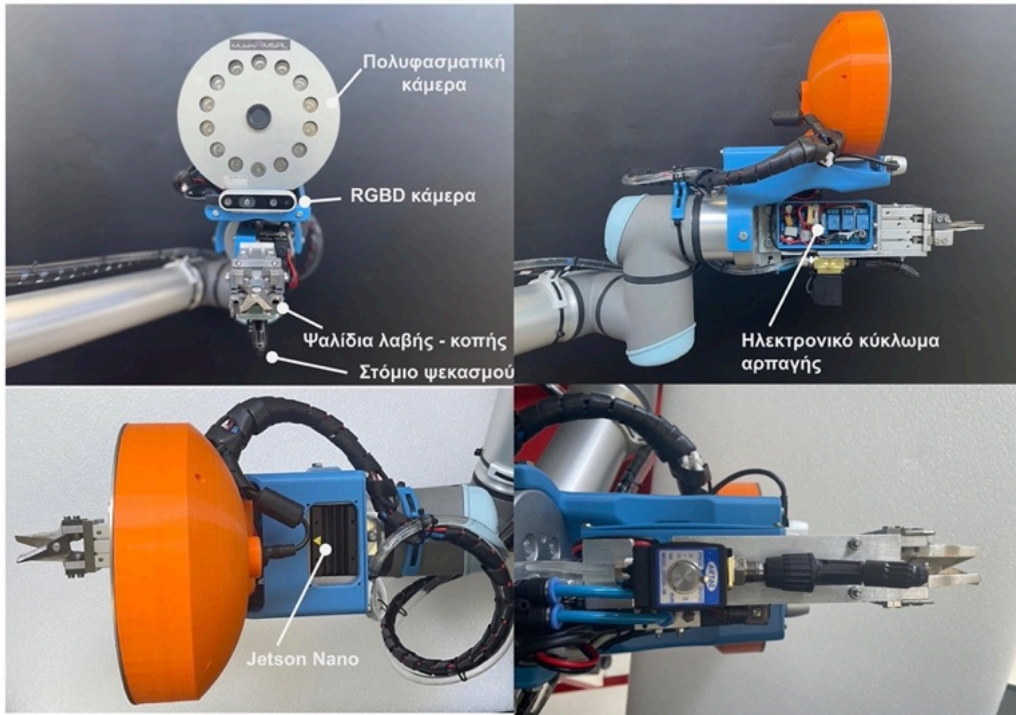
(b) Gripper for small packages



(c) Gripper for glass tube



## Πολύλειτουργική αρπάγη για χρήση σε ρομπότ θερμοκηπίου



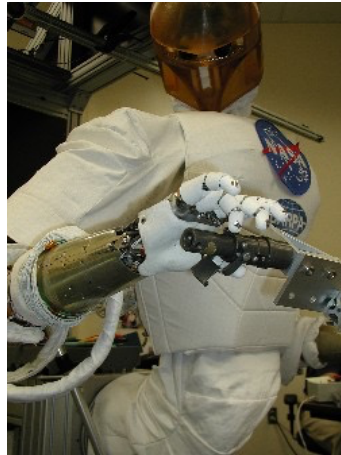
## Ρομπότ για εργασίες σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες τομάτας



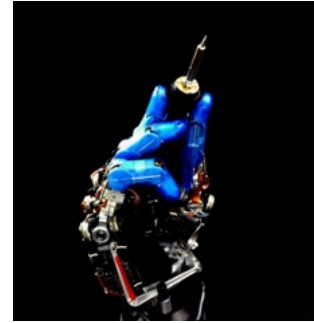
Ρομποτικό χέρι *Barrett*



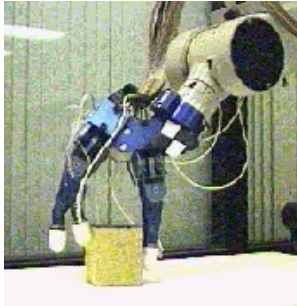
Ρομποτικό χέρι *Robo-naut*



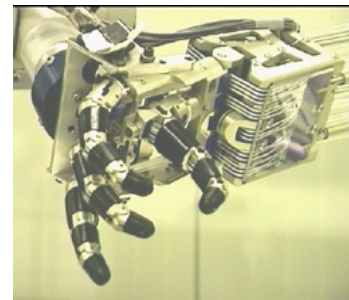
Ρομποτικό χέρι *DLR II*



Ρομποτικό χέρι *Salisbury*



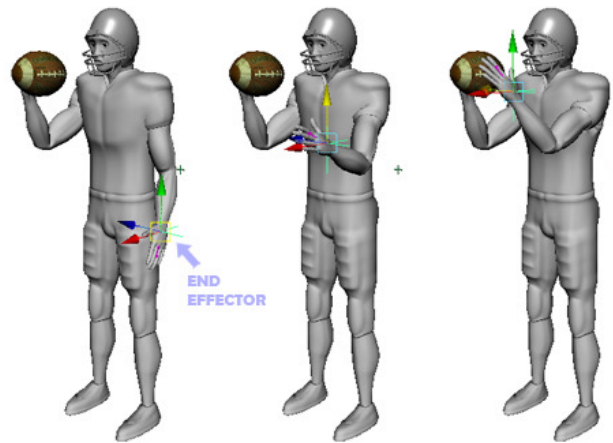
Ρομποτικό χέρι *Utah/MIT*



## ΜΕΡΟΣ II

Θέση, προσανατολισμός και  
μοντελοποίηση βασικών προβλημάτων ρομποτικής





## Κινηματική Ρομποτικού Βραχίονα

**Κινηματική ανάλυση:** Η μελέτη της κίνησης του ρομπότ στον χώρο χωρίς να εξετάζουμε τις δυνάμεις που την προκαλούν

### ▪ Ευθεία κινηματική ανάλυση

- Ποια είναι η θέση και ο προσανατολισμός του άκρου (εργαλείου, αρπάγης) όταν ξέρω τις γωνίες των αρθρώσεων του ρομπότ;
- Βοηθάει στην προσομοίωση

### ▪ Αντίστροφη κινηματική ανάλυση.

- Ποιες γωνίες αρθρώσεων επιτυγχάνουν μία επιθυμητή θέση του άκρου;
- Βοηθάει στον έλεγχο

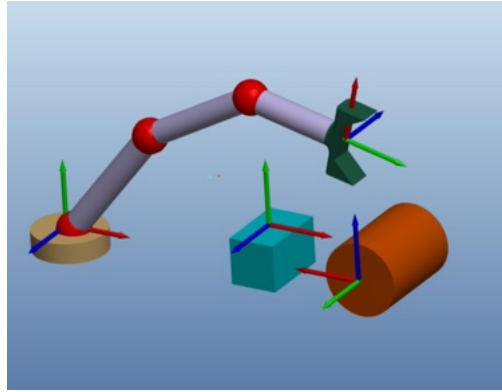
**Η δυναμική ανάλυση:** εξετάζει ταυτόχρονα την κίνηση του ρομπότ σε σχέση με τις ροπές και τις δυνάμεις που την προκαλούν ( λαμβάνεται υπ' όψιν η μάζα και η αδράνεια του ρομπότ)



## Περιγραφή στερεού σώματος στον χώρο

Το ρομπότ απαιτεί γνώση της εσωτερικής του κατάστασης αλλά και εξωτερικής πληροφορίας για να μπορέσει να επιτελέσει ένα επιθυμητό έργο. Απαιτείται η μαθηματική μοντελοποίηση του ίδιου του ρομπότ και του εξωτερικού κόσμου

Για την δημιουργία μαθηματικών μοντέλων απαιτούνται έννοιες όπως η θέση και προσανατολισμός.



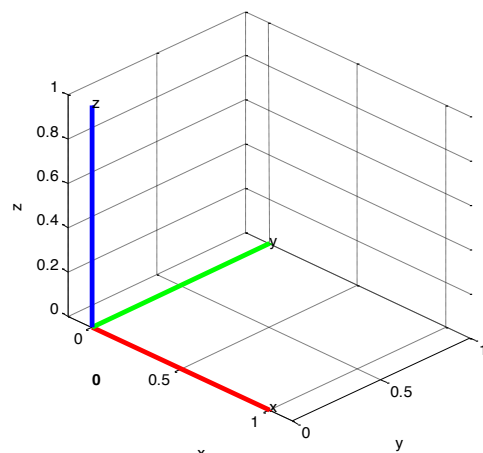
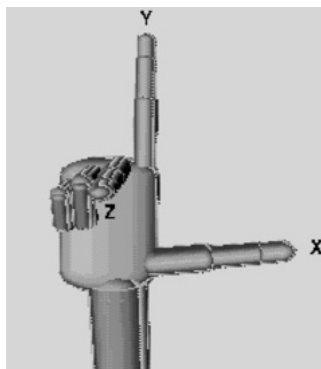
Για να προσδιορίσουμε τη θέση και τον προσανατολισμό αντικειμένων στο χώρο επισυνάπτουμε σε αυτά πλαίσια συντεταγμένων



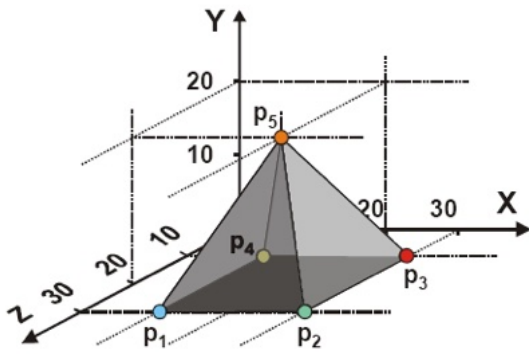
28

## Δεξιόστροφα και ορθομοναδιαία συστήματα συντεταγμένων

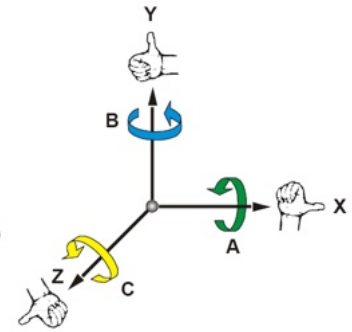
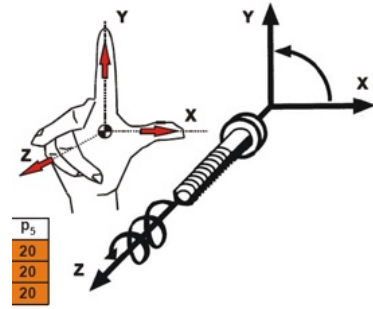
- Ένα ορθογώνιο Σύστημα Συντεταγμένων (ΣΣ) (ή σύστημα αναφοράς ή πλαίσιο αναφοράς) αποτελείται από τρία μοναδιαία διανύσματα  $(x_0, y_0, z_0)$  με κοινή αρχή το σημείο  $O$ .
- Συνήθως τους μοναδιαίους άξονες τους συμβολίζουμε με τα χρώματα κόκκινο, πράσινο, και μπλε για τους άξονες x-y-z αντίστοιχα



# Δεξιόστροφα και ορθομοναδιαία συστήματα συντεταγμένων



Σημείο	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$
X	10	30	30	10	20
Y	0	0	0	0	20
Z	30	30	10	10	20



Δρ. Φασουλάς Γιάννης

30

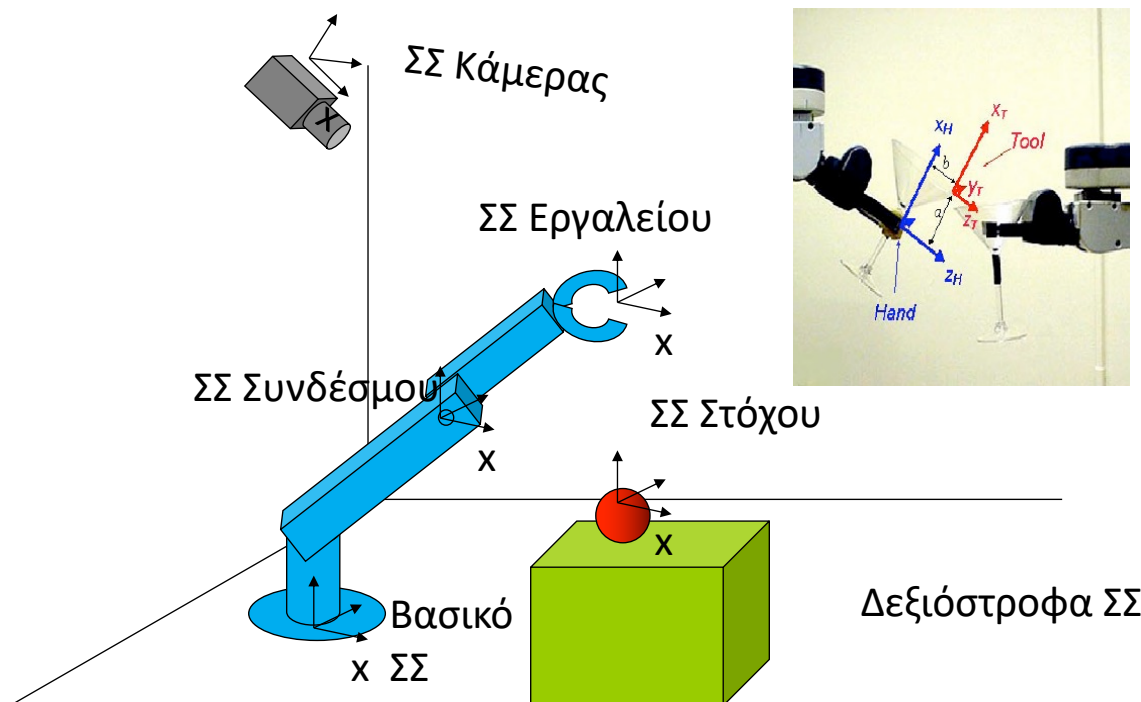
ΕΛΜΕΠΑ

Δρ. Ι. Φασουλάς

ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ Ι - Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

30

# Τοποθέτηση πλαισίων (ΣΣ)



Δεξιόστροφα ΣΣ

ΕΛΜΕΠΑ

Δρ. Ι. Φασουλάς

ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ Ι - Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

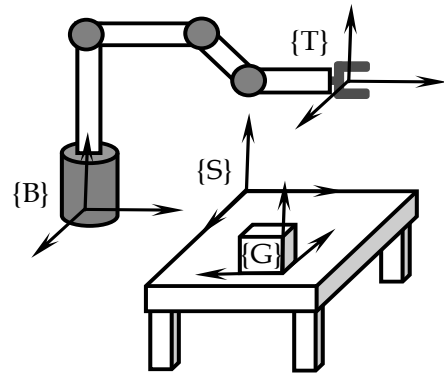
31

31

# Ένα σύννηθες πρόβλημα ρομποτικής

Στο σχήμα παρουσιάζεται ένα ρομπότ και ο πάγκος εργασίας πάνω στον οποίο υπάρχει ένας κύβος.

Επίσης έχουν ορισθεί τα πλαίσια:  
 {B} στη βάση του ρομπότ,  
 {T} στο άκρο της αρπάγης του ρομπότ,  
 {S} στην άκρη από το πάγκο εργασίας,  
 {G} του κύβου.



Έστω ότι γνωρίζουμε την θέση και τον προσανατολισμό του άκρου της αρπάγης ως προς τη βάση του ρομπότ, του πάγκου εργασίας ως προς τη βάση του ρομπότ, και του κύβου ως προς τον πάγκο εργασίας.

Να υπολογιστεί η θέση και ο προσανατολισμός του κύβου ως προς το εργαλείο του βραχίονα.

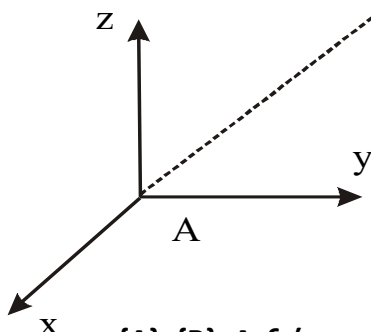
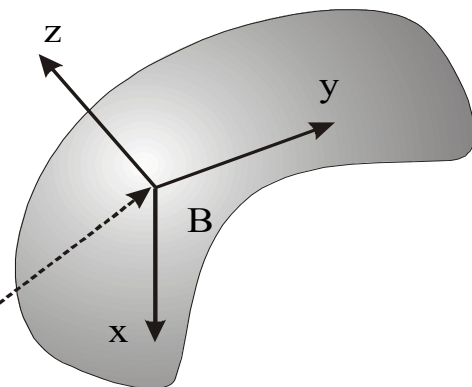
- Θα χρησιμοποιήσουμε την έννοια του ομογενούς μετασχηματισμού η οποία ενσωματώνει την πληροφορία της θέσης και του προσανατολισμού.



## Περιγραφή θέσης

- Σημείο = Άνυσμα θέσης
  - Συντεταγμένες σημείου

$$p_{ab} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}$$



**Μέτρο ανύσματος  $p_{ab}$**

$$\|p_{ab}\| = \sqrt{(p_x)^2 + (p_y)^2 + (p_z)^2}$$

Εκφράζει την απόσταση του σημείου  $p_{ab}$  από την αρχή του {A}

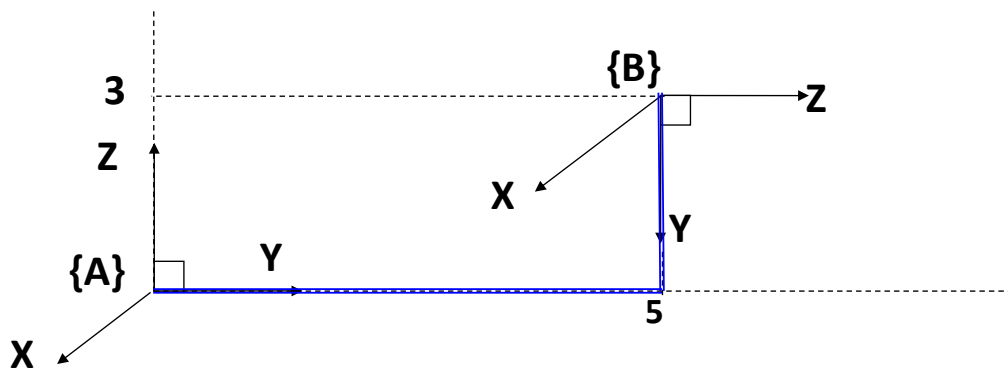
MATLAB

VRML



## ΕΡΩΤΗΣΗ

Ποια είναι η θέση του πλαισίου {B} ως προς το πλαίσιο {A};



Επιλέξτε απάντηση

**A:**  $P_{AB} = \begin{bmatrix} 1 \\ 5 \\ 3 \end{bmatrix}$

**B:**  $P_{AB} = \begin{bmatrix} 0 \\ 3 \\ 5 \end{bmatrix}$

**C:**  $P_{AB} = \begin{bmatrix} 0 \\ 3 \\ 3 \end{bmatrix}$

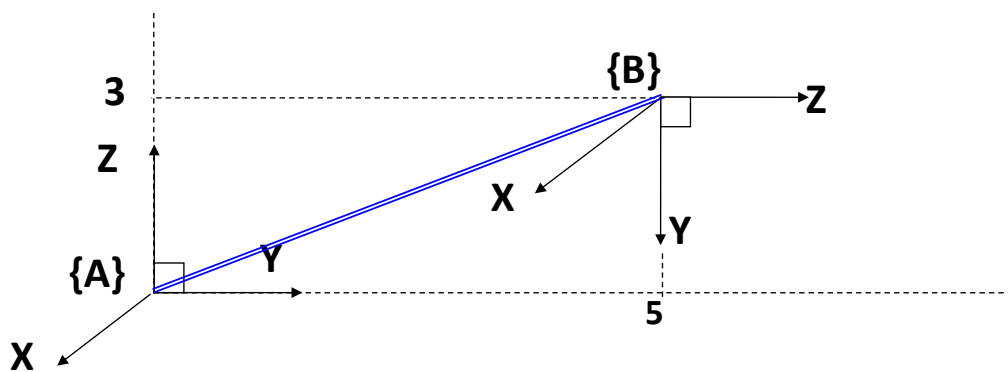
**D:**  $P_{AB} = \begin{bmatrix} 0 \\ 5 \\ 3 \end{bmatrix}$

Δρ. Φασουλάς Γιάννης

34

## ΕΡΩΤΗΣΗ

Ποια είναι η απόσταση της αρχής του πλαισίου {B} από το πλαίσιο {A};



Επιλέξτε απάντηση

**A:** 5.9161

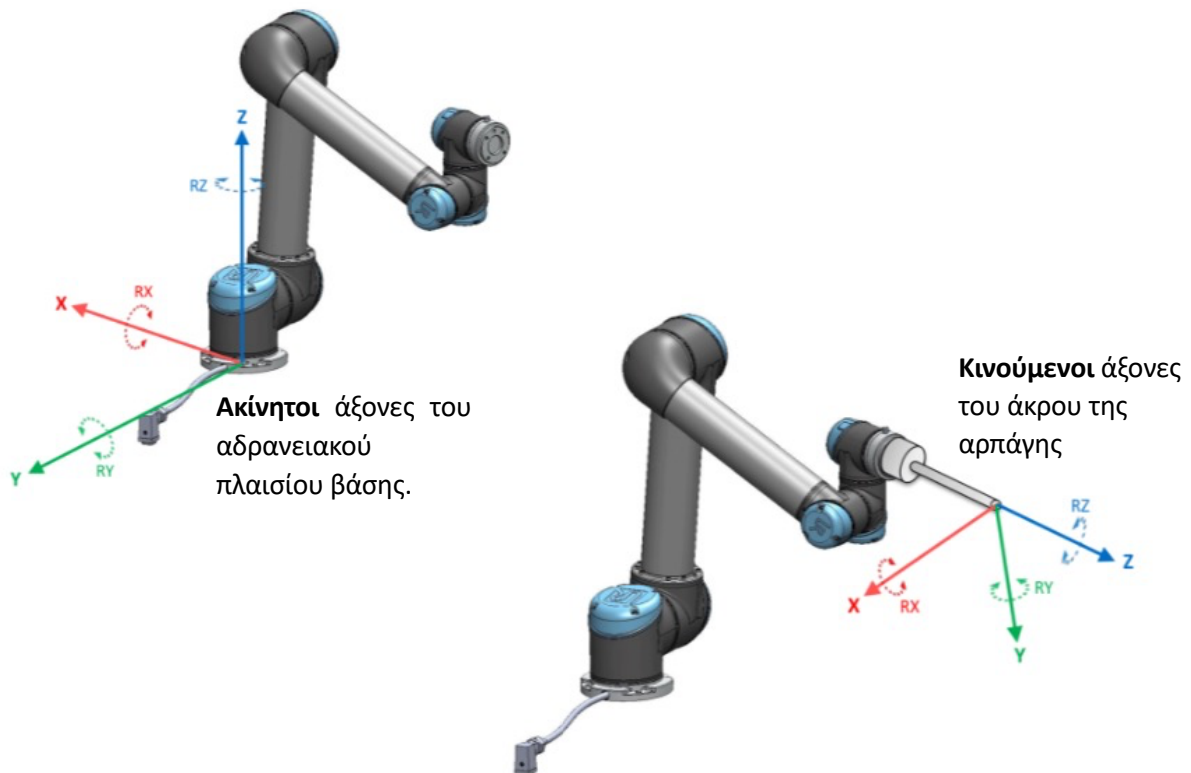
**B:** 1.7321

**C:** 4.2426

**D:** 5.8310

Δρ. Φασουλάς Γιάννης

35



## Ορισμός προσανατολισμού μέσα από 3 βασικές γωνίες

Προσανατολισμός με τοπική παραμετροποίηση  
3 Ανεξάρτητοι παράμετροι

- ★ 3 Γωνίες στροφής γύρω από τους βασικούς άξονες του αδρανειακού πλαισίου (π.χ. πλαίσιο βάσης του ρομπότ)



ΒΑΣΙΚΕΣ ΓΩΝΙΕΣ X-Y-Z

- ★ 3 Γωνίες στροφής γύρω από τους βασικούς άξονες του κινουμένου πλαισίου ( π.χ πλαίσιο TCP του ρομπότ)



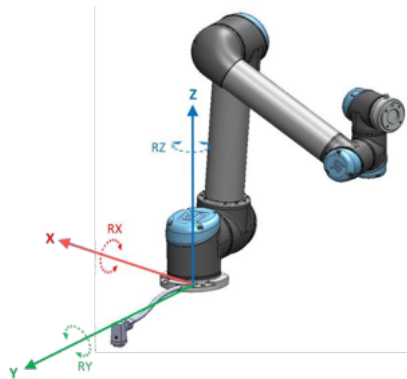
ΓΩΝΙΕΣ EULER Z-Y'-X'', Z-Y'-Z''

- Ο τονούμενος άξονας αντιστοιχεί σε στροφή γύρω από κινούμενο άξονα



- Ο ελεγκτής του βραχίονα υπολογίζει κάθε στιγμή την πόζα του πλαισίου {tool} ως προς τη βάση του βραχίονα {base} δίνοντάς την στη μορφή έξι μεταβλητών δομημένων σε μορφή πίνακα 1x6 ως εξής  $[X, Y, Z, R_x, R_y, R_z]$  τις οποίες από εδώ και στο εξής θα τις ονομάζουμε **UR coordinates**,
- τα στοιχεία X, Y, Z αναφέρονται στις καρτεσιανές συντεταγμένες της αρχής του {tool}, ενώ τα  $R_x, R_y, R_z$  αποτελούν τις τρεις συνιστώσες που συνθέτουν

αυτό που ονομάζουμε **διάνυσμα περιστροφής** (*rotation vector*)  $\mathbf{u} = \begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{bmatrix} = \vec{k}\theta$



$\vec{k}$  : μοναδιαίο διάνυσμα



$$\theta = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2}$$

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2}}$$

